

高強度パルスイオンビームによるパルスイオン注入技術 および材料表面処理技術の開発

研究代表者 理工学研究部（工学） 升方 勝己

1. プロジェクトの背景・目的

現在、シリコン半導体は材料限界に近づきつつあり、シリコンカーバイド(SiC)がパワーデバイスや高周波デバイスに適した次世代の半導体材料として注目されている。SiC に代表されるワイドギャップ半導体は、シリコン半導体に比べ化学結合力が強い物質系であるため、従来のシリコン半導体技術とは異なる基礎的な研究開発が必要となる。デバイス作製プロセスにおいて、伝導度を制御するため局所部分に不純物を添加するイオン注入技術が必須であり、SiC に対しては従来のイオン注入技術は多くの制限があり、実用化には適していない。

本プロジェクトは、SiC を中心としたワイドギャップ半導体材料へのイオン注入プロセスとしてパルスパワー技術を用いた新しい“パルスイオン注入法”を実現するためのパルスイオンビーム発生技術を開発し、パルスイオン注入による半導体素子作製の実証を目指す。しかし、これまでのパルスイオンビーム発生技術では、イオン注入に適するイオンビームを発生させることができなかった。本プロジェクトでは、ガスプラズマガンを用いたパルス重イオンビーム発生技術を開発し、元素が気体である各種イオン種のイオンビーム発生を可能にした。しかし、半導体のドーパント元素の多くが固体であることから、固体をイオン源とする大電流パルスイオンビーム発生技術が必要となるので、本年度はパルス金属イオンビーム発生技術の開発を行った。今後、イオン純度、ビーム発生の再現性、ビームの均一性を向上させ、パルスイオン注入実験が可能な装置に改善し、そのビームを半導体材料に照射し、イオンの導入・活性化、イオン注入層の導電率、結晶のアニール効果を検証することでパルスイオン注入の実証、実用化を目指す。

(2)研究成果

本年度の研究では、p 型ドーパント用の大電流パルス金属イオンビーム発生技術の開発、プラズマフォーカス装置を用いたダイヤモンドライクカーボン薄膜の生成実験を行った。以下に、その研究成果を報告する。

1. 大電流パルス金属イオンビーム発生技術の開発

半導体の p 型のドーパントとして機能するアルミニウムイオンビームを発生させるために真空アーク放電を利用した同軸プラズマガンのイオン源を開発してきた。今年度は、このイオン源を用いたパルスイオンビーム発生装置の開発を行ってきた。装置は高電圧パルスパワー発生器、真空アーク同軸プラズマガン、および B_y 型磁気絶縁イオン加速ギャップ(ダイオード)から構成されている。その典型的な動作波形を図.1 に示す。加速電圧 V_d がピーク値で 220 kV、電流 I_d がピ

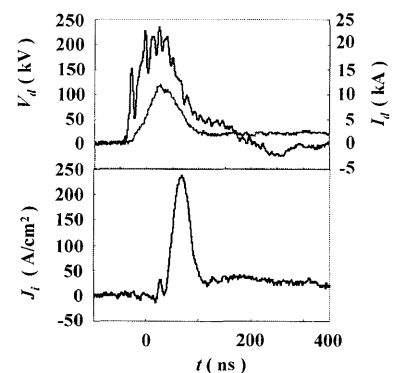


図.1 典型的な波形

ーク値で 12 kA のとき、イオン電流密度 J_i が 228 A/cm²、パルス幅 40 ns (FWHM) のパルスイオンビームを得ることができた。

次に、トムソンパラボラ分析器 (TPS) を用いてパルスイオンビームのエネルギーとイオン種の同定を行った。測定に使用した TPS の概略図を図.2 に示す。TPS は電場と磁場を同方向に印加することでイオンビームをイオン種とエネルギーに応じて偏向させる。ここで、磁場と電場による偏向量をそれぞれ x , y とすると、TPS で検出される偏向パターンは下記の式で与えられる。

$$y = a \left(\frac{M}{Z} \right) x^2 \quad \text{M:イオンの質量, Z:イオンの価数}$$

係数 a は TPS の設計値によって決まる定数である。また、検出器として CR-39 を使用した。測定結果の一例を図.3 に示す。この図からパルスイオンビームに含まれるイオン種は 1 価のアルミニウムイオン、2 価のアルミニウムイオン、3 価のアルミニウムイオン、水素イオンであることがわかる。ここで、電極にアルミニウムを用いたにもかかわらず水素イオンが検出された原因としては、電極に付着した吸着ガスの影響と考えられる。また、各イオンのエネルギーは、それぞれ 1 価のアルミニウムイオンは 60~230 keV、2 価のアルミニウムイオンは 260~400 keV、3 価のアルミニウムイオンは 130~220 keV、水素イオンは 90~130 keV に分布していた。さらに、このトラックパターンからアルミニウムと水素の比率を算出したところ、ビーム全体に対する比率は Al^+ 、 Al^{2+} 、 Al^{3+} を合わせたアルミニウムの比率が 88.6 % であるのに対し、水素は 11.4 % という比較的高純度のパルスアルミニウムイオンビームが得られた。

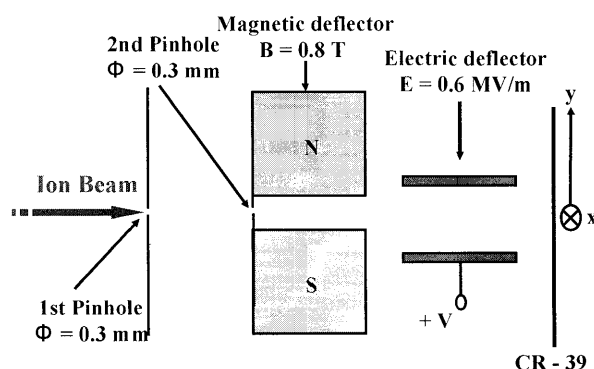


図.2 トムソンパラボラ分析器の概要

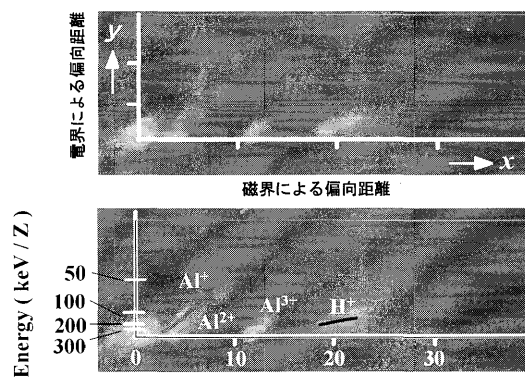


図.3 トラックパターン

この結果から、金属のような固体をイオン源とした大電流パルス重イオンビーム発生技術の開発に成功したが、パルスイオン注入に要求される純度には及ばなかった。今後、純度の向上、ビーム発生の再現性、ビームの均一性などを向上させるため装置の改良を行う必要がある。

2. プラズマフォーカス装置を用いたダイヤモンドライクカーボン薄膜の生成

高密度 Z ピンチ放電の一種であるプラズマフォーカス装置は、強力なパルスイオンビームやパルス電子ビームを発生させることができるので、これらのビームを利用したアブレーションプラズマによるダイヤモンドライクカーボン(DLC)薄膜の生成実験を行った。イオンや電

電子ビームが材料（ターゲット）に照射されると、ビームのエネルギーが材料の表面層のみに付与されるためにエネルギー密度が高くなり、ターゲット表面を瞬間的に加熱して非常に高密度のプラズマを生成することができる（アブレーションプラズマ）。今回の実験ではターゲット材料としてカーボン、堆積基板として単結晶シリコンを使用した。

電子ビームを利用したアブレーションプラズマによりシリコン基板上に堆積した薄膜の特性をラマン分光法で測定した結果を図.4(a)に示す。ここで、 z は堆積基板のターゲットからの距離を示しており、値が大きくなるにつれてターゲットから離れていくことになる。この実験結果から、薄膜のラマンスペクトルに典型的な、大きな半値幅をもつ波数 1550 cm^{-1} 付近の G (Graphite) ピークと 1350 cm^{-1} 付近の D (Disorder) ピークがあることがわかる。今までの事例より、G ピークは C=C 鎖状炭素や六員環中の sp^2 炭素原子対の伸縮振動モードに、D ピークは六員環中の sp^2 炭素原子の息つき(breathing)モードに起因していると考えられており、これら 2 つのピークが存在する薄膜が DLC であると考えられている。今回得られた結果を見ると、DLC 膜の典型的な D ピーク、G ピークが存在しているので、堆積された薄膜は DLC と判断することができる。また、それぞれ設置した距離において、ピークの位置が変化していることがわかり、G ピークや D ピークの位置、G ピークの強度に対する D ピークの割合の違いに伴い DLC 膜の特性も大きく変化する。G ピークが D ピークから遠ざかるにつれて sp^2 結合を多く含む薄膜となり、D ピークが G ピークに近づくにつれて sp^3 結合を多く含む薄膜となる。

次に、イオンビームによるアブレーションプラズマを用いた実験について述べる。シリコン基板上に成膜された薄膜をラマン分光法で測定すると、電子ビームの場合と同じようにラマンスペクトルには G ピークや D ピークを観測することができた (図.4(b))。この結果、イオンビームを用いても DLC 薄膜を生成することができた。図 4(a)と図 4(b)を比較すると、電子ビームを利用した方が G ピークの値が大きく、G ピークと D ピーク間の差が小さいことがわかる。これは sp^3 結合を含む割合が多いことを示しているので、電子ビームで生成された DLC 薄膜の方が高硬度であることがわかる。

次に、電子ビームとイオンビームを用いて生成された DLC 薄膜の硬度をナノインデントで測定した。その硬度測定結果を表.1 に示す。この結果から、電子ビームを用いた DLC 薄膜生成法の方がイオンビームを用いた生成法に比べて約 3 倍大きい硬度の DLC 薄膜を得ることができた。これは上述のラマンスペクトルの実験結果と一致する。しかし、従来の方法で成

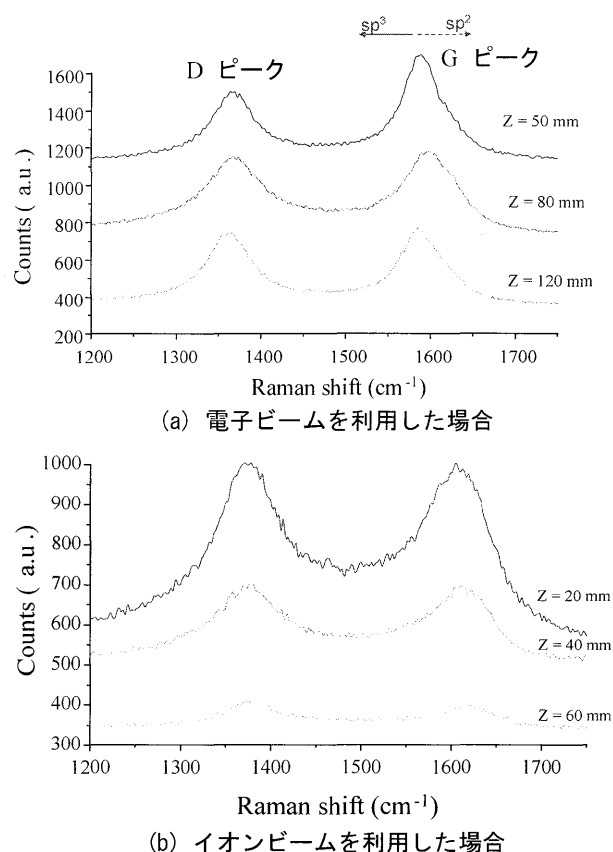


図.4 DLC 膜のラマンスペクトル測定

膜された DLC 薄膜の硬度(約 18GPa)に比べて硬度は小さかった。

表.1 各生成法によって生成された DLC 薄膜の硬度測定

(a) 電子ビームによる生成		(b) イオンビームによる生成	
Sample Position (mm)	Hardness (GPa)	Sample Position (mm)	Hardness (GPa)
z=50	9.512	z=20	2.678
z=80	6.88	z=40	3.76
z=120	9.44	z=60	2.014

以上、本年度の研究成果の要点を記述した。ビーム発生技術に関しては従来技術に比べてはるかに高純度(～88%)のパルスアルミニウムイオンビームを実現することができ、半導体の p 型のドーパントとして利用することが可能である。しかし、ビーム品質を向上させる必要があるので、今後はこれまでのビーム発生技術とビーム純度向上が期待できる両極性パルス加速器を融合させて、産業応用に向けた技術の開発を行い、パルスイオンビームの最適化、半導体へのイオン注入効果の評価を目指した研究を行う。また、DLC 薄膜生成に関しては、プラズマフォーカス装置を用いて DLC 薄膜を成膜することに成功し、1 ショットあたり 100 nm の DLC 膜を堆積させることができた。今後は、DLC 膜の成膜条件の最適化を行っていく必要がある。

(3)プロジェクト成果

本年度は特許・企業・技術移転に直接結びつく技術開発には至らなかったが、半導体用の p 型ドーパント用のイオンビーム源の開発のメドがたった。今後、ビーム純度、ビームの均一性などのイオンビームの性能を向上させ、半導体へのイオン注入効果を実証することができれば、本プロジェクトで開発された大電流パルスイオンビーム発生技術は技術移転や企業化に結びつく可能性がある。

(4)プロジェクト成果の応用・効果・構想

本研究の目的である半導体へのパルスイオン注入技術、および材料表面処理技術の実用化に向けて今年度は p 型ドーパント用の大電流パルス金属イオンビーム発生に成功した。これまでのプロジェクト研究により、イオンビームの性能向上の問題はあるが、半導体用の n 型と p 型の両ドーパントに対する大電流パルスイオンビームの発生に成功した。今後、イオンビームの性能向上のために装置改良を行い、n 型と p 型の両ドーパントに対するイオンビーム発生技術が確立されれば、新しいイオン注入技術であるパルスイオン注入法の基礎的研究がさらに進み、炭化ケイ素デバイス実現への流れが一層加速され、炭化ケイ素は次世代半導体としての材料としての期待度はさらに高まることになる。

(5)利用施設

なし